

“Modelo del electrón helicoidal”

Oliver Consa

oliver.consa@gmail.com

Department of Physics and Nuclear Engineering (UPC)

Spain, June 2014

Abstract

Se presenta un modelo semiclásico del electrón basado en el Principio del Movimiento Helicoidal ("Un electrón libre se mueve siempre a la velocidad de la luz siguiendo un movimiento helicoidal, con un radio constante, y con la dirección de desplazamiento perpendicular al plano de rotación"). Este modelo interpreta el Zitterbewegung como un movimiento de rotación real del electrón causante del spin y de su momento magnético. A partir de este modelo se obtiene el cuanto de flujo magnético y la resistencia hall cuántica como parámetros del electrón y se deriva la teoría de la relatividad especial a partir del movimiento helicoidal del electrón. Finalmente se propone una corrección para el valor de la longitud de onda de de Broglie que pone en duda la propia validez de la ecuación de Dirac.

Introducción

La Mecánica Cuántica (MC) está considerada la teoría física más exacta disponible en la actualidad, sin embargo, desde su formulación ha estado acompañada de una gran polémica. La polémica no está en los resultados que ofrece sino en la interpretación física de los conceptos matemáticos.

La “Interpretación de Copenhague” de la MC propuesta por Bohr y Heisenberg fue fuertemente criticada por muchos físicos que habían participado en el desarrollo de la teoría. El principal crítico fue el mismísimo Albert Einstein, quien consideraba que la MC era una teoría estadística y probabilística que sólo era válida para estudiar el comportamiento de conjuntos de partículas. Einstein consideraba que el comportamiento de las partículas individuales debía ser determinista (“Dios no juega a los dados”) por lo que aplicar la MC a partículas individuales lleva necesariamente a contradicciones lógicas y situaciones paradójicas (ej. “la paradoja del gato de Schrodinger”).

Para Einstein, la MC era incompleta, por lo que debía existir una teoría más profunda basada en “variables ocultas” que permitiese explicar el funcionamiento de las partículas subatómicas de manera individual. Einstein y sus seguidores no fueron capaces de encontrar una teoría de variables ocultas compatible con la MC, de este modo la “Interpretación de Copenhague” se impuso como la interpretación de referencia.

Si asumimos que la MC sólo es aplicable a conjuntos de partículas, se hace necesaria una nueva teoría determinista que explique el comportamiento de las partículas individuales. El objetivo de este trabajo es proponer un modelo semiclásico de electrón libre a partir de los datos experimentales conocidos.

Oscilación del electrón libre

En 1923, Louis de Broglie sugirió la posibilidad de que la ecuación de Planck ($E=hf$) también podría aplicarse a las partículas de materia. Si esta hipótesis fuera correcta, las partículas estarían caracterizadas por una “frecuencia propia”. Tomando la ecuación de Einstein ($E=mc^2$) e igualando ambas energías, obtenemos la frecuencia propia del electrón:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

Esta frecuencia de resonancia coincide con el valor de la “frecuencia compton” del electrón y puede observarse experimentalmente en el “efecto compton”. La frecuencia propia del electrón puede entenderse como la frecuencia de resonancia del electrón en su interacción con ondas electromagnéticas. Además de una frecuencia de resonancia, esta frecuencia también podría significar una frecuencia real de “oscilación” o “vibración” del electrón.

Si el electrón estuviera vibrando con una frecuencia constante, generaría una corriente eléctrica igual a la carga eléctrica por la frecuencia ($I=ef$). Por las leyes de Maxwell, toda corriente eléctrica genera un campo magnético. Por lo tanto, si el electrón realmente oscila, deberíamos detectar experimentalmente un momento magnético asociado a dicha oscilación. Y efectivamente este momento magnético del electrón se ha detectado y medido con gran precisión. El momento magnético del electrón coincide aproximadamente con el valor conocido como “Magnetón de Bohr”.

$$\mu_e = \mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

El Magnetón de Bohr se corresponde con el momento magnético que tendría una carga unitaria rotando con un momento angular igual a la constante reducida de Planck:

$$L = mrv = \hbar$$

La relación entre el momento magnético y el momento angular se conoce como “razón giromagnética” y tiene el valor de “ $e/2m$ ”. Este valor es coherente con el momento magnético generado por una corriente I rotando sobre una superficie circular de radio r .

$$\mu_e = IS = \frac{ev}{2\pi r}(\pi r^2) = \frac{evr}{2} = \frac{e}{2m}(mrv) = \frac{e}{2m}L$$

La razón giromagnética del electrón puede observarse experimentalmente al aplicar campos magnéticos externos, por ejemplo en el “efecto Zeeman” o el “experimento de Stern-Gerlach”.

$$E = gB = \frac{e}{2m}B$$

A primera vista todo parece indicar que el electrón es una esfera que gira sobre sí misma con una frecuencia igual a la frecuencia Compton, generando un momento angular (spin) igual a constante reducida de Planck y un momento magnético igual al magnetón de Bohr. Sin embargo, al calcular la velocidad de rotación del electrón necesaria, obtenemos una velocidad miles de veces superior a la velocidad de la luz.

Para resolver el problema de las velocidades de rotación superlumínicas, la MC considera al electrón como una partícula de carga puntual estática sin rotación. Por lo tanto, los momentos magnéticos y angulares serían valores intrínsecos del electrón y no estarían asociados a ningún tipo de movimiento real. Esta postura de la MC sobre la inexistencia de movimiento real del electrón simplemente trata de eludir el problema en lugar de aportar una explicación física a la frecuencia de vibración del electrón. Una posible explicación alternativa a esta aparente contradicción es suponer que el electrón no es una esfera.

Electrón Anular

En 1915, Alfred Lauck Parson [1] propuso una nueva teoría del electrón con una geometría diferente. Su modelo suponía que el electrón tenía una geometría en forma de anillo y que la carga circulaba por el anillo provocando un campo magnético. El electrón se comportaría no sólo como la unidad de carga electrónica sino como la unidad de carga magnética o "magnetón". Algunos importantes físicos de su época como David Webster, Gilbert Lewis o Leigh Page realizaron estudios apoyando el modelo de "magnetón" de Parson. El más importante de estos estudios lo realizó Arthur Compton [2], que escribió una serie de artículos donde mostraba que su recién descubierto "Efecto Compton" se explicaba mejor con el modelo de electrón anular de Parson que con el modelo de electrón esférico. Todos estos estudios fueron recopilados en 1918 por H. Stanley Allen en el documento "The Case for a Ring Electron" [3] y debatidos en una reunión de la Physical Association. El modelo de electrón anular no tuvo mucha aceptación y quedó descartado definitivamente en 1923 por la ecuación de onda del electrón de Schrodinger y la Mecánica Cuántica. El modelo de electrón anular de Parson ha sido recuperado sin éxito en diversas ocasiones por investigadores como Iida [4], Bostick [5], Bergman y Wesley [6], Auvermann, [7] Hong, Ryder [8], Gauthier, Charles W. Lucas o Kanarev.

Otros investigadores, como Jennison [9] o Williamson y van der Mark [10] proponen un modelo de electrón anular similar, con la hipótesis adicional de que el electrón es en realidad un fotón atrapado en un vórtice. La colisión de un electrón con un positrón permitiría deshacer los vórtices y liberar los fotones. Sin embargo, ninguno de estos autores ha podido explicar adecuadamente cómo se genera la carga eléctrica a partir de un fotón sin carga.

El modelo del electrón anular postula que el electrón tiene una geometría en forma de anillo de grosor extremadamente fino y con un radio unas 2000 veces más grande que un Protón. Por el anillo circula una carga eléctrica unitaria a la velocidad de la luz, provocando una corriente eléctrica y su correspondiente campo magnético. Este modelo permite compaginar las evidencias experimentales de que el electrón tiene un tamaño extremadamente pequeño (que se correspondería con el grosor del anillo) y a la vez un tamaño relativamente grande (que se correspondería con la circunferencia del anillo).

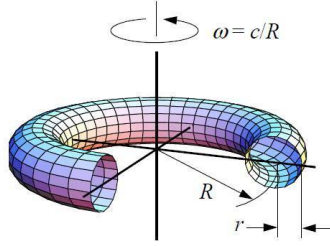


Figure 1: The Spinning Ring Model of the Electron

La circunferencia del anillo coincide con la “longitud de onda de compton”, mientras que el radio coincide con la “longitud de onda de compton reducida”. Por su parte, la frecuencia y la frecuencia angular del movimiento coinciden con la “frecuencia compton” y la “frecuencia compton reducida” respectivamente.

$$\lambda_c = 2\pi r = \frac{h}{mc}$$

Sustituyendo la frecuencia compton en la fórmula $E=hf$, obtenemos el mismo valor de energía que el que proporciona la fórmula $E=mc^2$. El movimiento de la carga unitaria alrededor del anillo a la velocidad de la luz produce un momento angular (spin) de valor:

$$L = mrv = m \frac{\hbar}{mc} c = \hbar$$

La carga en movimiento genera una corriente eléctrica constante.

$$I = \frac{ec}{2\pi r} = \frac{emc^2}{h} = ef$$

Esta corriente eléctrica produce un campo magnético inducido, con un momento magnético igual al Magnetón de Bohr:

$$\mu_e = IS = \frac{ec}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{ecr}{2} = \frac{e\hbar}{2m} = \mu_B$$

El anillo actúa como una antena circular. En este tipo de antenas, la frecuencia de resonancia coincide con la longitud de la circunferencia. En el caso del electrón anular, la frecuencia de resonancia coincide con la frecuencia de onda compton.

Este modelo presenta dificultades para explicar la naturaleza de la sustancia que forma el anillo y sus características físicas, así como su estabilidad. Cualquier distribución de carga eléctrica del mismo signo sobre un volumen implica unas fuerzas de repulsión electromagnética enormes entre sus partes que harían explotar la partícula. Realmente, la única distribución de carga eléctricamente estable es la carga puntual.

Por otro lado, la existencia física del anillo no es necesaria. Podemos asumir que toda la carga del electrón se encuentra concentrada en un único punto infinitesimal, al que llamaremos Centro de Carga (CC), que rota a la velocidad de la luz alrededor de un punto del espacio al que llamaremos Centro de Masas (CM). Con este modelo de electrón infinitesimal en rotación, el anillo no tiene sustancia ni propiedades físicas, el anillo es simplemente la trayectoria del CC alrededor del CM.

El CC no tiene masa, por lo que puede tener un tamaño infinitesimal sin colapsar en un agujero negro y desplazarse a la velocidad de la luz sin infringir la teoría de la relatividad. La masa del electrón no se encuentra en un único punto sino que se encuentra distribuida por todo el campo electromagnético del electrón. Esta masa se corresponde con la energía cinética y potencial del electrón. Por simetría, el CM del electrón se corresponde con el centro del anillo.

De esta manera, sustituimos un modelo de electrón estático con geometría anular, por un modelo de electrón dinámico, con movimiento circular perpetuo. En la práctica, la frecuencia de rotación es tan increíblemente alta que podemos considerar que el CC se encuentra en todos los puntos de la trayectoria al mismo tiempo. A efectos prácticos, este modelo dinámico del electrón es equivalente al modelo geométrico de electrón anular.

Podemos mostrar los postulados de este modelo de electrón libre haciendo un símil con los postulados de Bohr para su modelo atómico:

- El CC del electrón se desplaza siempre a la velocidad de la luz describiendo órbitas circulares en torno a su CM sin radiar energía
- El CC orbita con un momento angular igual a la constante reducida de Planck
- El electrón emite y absorbe energía electromagnética cuantizada según la fórmula $E=hf$
- La emisión o absorción de energía implica una aceleración del CM.

El movimiento del CC es constante y sin pérdida de energía, por lo que podemos considerar el electrón como un anillo superconductor con una corriente persistente. Este tipo de corrientes se han detectado experimentalmente en materiales superconductores.

Con este modelo del electrón sería posible establecer la posición del CM de un electrón en reposo con total precisión, pero es imposible establecer la posición del CC con una precisión inferior al radio del anillo. Esta característica del electrón anular es equivalente al Principio de Incertidumbre de la MC.

Experimentalmente el momento magnético del electrón es ligeramente superior al magnetón de Bohr. Con este modelo es imposible explicar el momento anómalo del electrón, lo que nos lleva a suponer que el electrón no es realmente una partícula elemental sino que existe una subestructura del electrón que está fuera del alcance del presente modelo de electrón.

Circuito LC cuántico

Por la Ley de Biot-Savart, el campo magnético en el centro del anillo es de $B = 3,23 \times 10^7$ Teslas:

$$B = \frac{\mu_o I}{2R}$$

Un campo magnético de 30 mil millones de Teslas es gigantesco. En comparación, el campo magnético de la Tierra es 0,000005 T y el campo magnético artificial más grande creado por el hombre es de tan solo 90 T. El campo magnético en el centro de un electrón es equivalente al campo magnético de una estrella de neutrones!.

Por su parte, el campo eléctrico en el centro del anillo coincide con el valor del campo magnético multiplicado por la velocidad de la luz ($E = cB = 9,61 \times 10^{12}$ N/C):

$$E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

Definir una frecuencia propia para el electrón equivale a definir un tiempo propio para el electrón ($T=1/f$). A partir de la energía del electrón podemos definir otros parámetros del electrón, como la Potencia, que es la energía por unidad de tiempo.

$$P = E/T = Ef$$

La energía del electrón es muy baja, pero la frecuencia de oscilación es extremadamente grande, lo que da como resultado una potencia considerable de unos 10 GigaVatios ($P = 1,014 \times 10^7$ W). En la misma línea de razonamiento podemos calcular el potencial eléctrico como la energía del electrón por unidad de carga eléctrica, lo que nos da un valor aproximado de medio millón de voltios ($5,111 \times 10^5$ V).

$$V = \frac{E}{e} = \frac{mc^2}{e}$$

Ya hemos calculado anteriormente la corriente eléctrica de unos 20 Amperios ($I = ef = 19,832$ A). Multiplicando el voltaje por la corriente obtenemos nuevamente una potencia de unos 10 GigaVatios ($P = VI$).

Estos valores calculados de Potencia, Corriente, Voltaje y Campos Electromagnéticos en el centro del anillo son extremadamente altos. Podrían ser medidos experimentalmente en el futuro y servir como medio para validar o descartar este modelo del electrón.

Por la Ley de Ohm podemos obtener la Impedancia del electrón, dividiendo el Voltaje del electrón por la corriente. El valor obtenido (25.812 Ohms) coincide con el valor de la Resistencia Hall Cuántica (RHQ). Este valor es bastante sorprendente, ya que es observable a nivel macroscópico y no fue descubierto experimentalmente hasta 1980.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{h}{e^2}$$

Por otro lado, según la ley de Faraday, el voltaje es la variación del flujo magnético por unidad de tiempo. Por lo que en un periodo de rotación,

$$V = \frac{\phi}{T}$$

$$\phi = VT = \frac{mc^2}{e} \frac{h}{mc^2} = \frac{h}{e}$$

Que coincide con el valor del Cuanto de Flujo Magnético, otro valor observable macroscópicamente. Este valor era esperable ya que en este modelo el electrón se comporta como un anillo superconductor, y en experimentalmente sabemos que el flujo magnético en un anillo superconductor está cuantizado.

La existencia de una frecuencia propia del electrón implica un movimiento oscilatorio de la carga, generando una corriente y voltaje asociados. Lo que hará que la partícula se comporte como un circuito LC cuántico. Podemos calcular los coeficientes de Autoinducción (L) y la Capacitancia (C) del electrón, obteniendo unos valores de $L=2,084 \times 10^{-16}$ H y $C=3,135 \times 10^{-25}$ F:

$$L = \frac{\phi}{I} = \frac{h^2}{mc^2 e^2}$$

$$C = \frac{e}{V} = \frac{e^2}{mc^2}$$

Aplicando las fórmulas del Circuito LC, podemos obtener los valores de Impedancia y Frecuencia de Resonancia, que coinciden con los valores anteriormente calculados de Impedancia y Frecuencia propia del electrón:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{h^2/mc^2 e^2}{e^2/mc^2}} = \frac{h}{e^2}$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(h^2/mc^2 e^2)(e^2/mc^2)}} = \frac{mc^2}{h} = f$$

La energía de la partícula va oscilando entre energía eléctrica y magnética, siendo el valor medio:

$$E = \frac{LI^2}{2} + \frac{CV^2}{2} = \frac{hf}{2} + \frac{hf}{2} = hf$$

Los cálculos anteriores son válidos para cualquier partícula elemental con una carga eléctrica unitaria, una frecuencia propia de vibración y una energía propia que cumpla la ecuación de Planck ($E=hf$).

De este resultado podemos inferir que el electrón está formado por dos elementos indivisibles: un cuanto de carga eléctrica y un cuanto de flujo magnético, cuyo producto es igual a la constante de Planck. El

flujo magnético del electrón es, simultáneamente, la causa y la consecuencia del movimiento circular de la carga eléctrica.

$$e\phi = h$$

Zitterbewegung

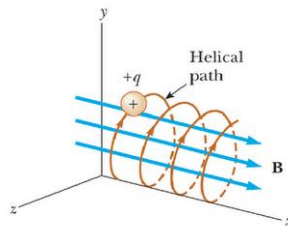
Analizando las posibles soluciones a la Ecuación de Dirac, en 1930 Schrödinger encontró un término que representa una inesperada oscilación cuya amplitud es igual a la longitud de onda Compton, a la que llamó "Zitterbewegung".

En 1953 Kerson Huang [11] dio una interpretación clásica de la ecuación de Dirac, según la cual el zitterbewegung es el mecanismo causante del momento angular del electrón (spin), y este momento angular es a su vez el causante del momento magnético del electrón. Desde entonces se han publicado decenas de estudios matemáticamente muy elaborados sobre la Ecuación de Dirac en los que el Zitterbewegung se ha interpretado como un movimiento oscilatorio real del electrón. Entre los investigadores de reconocido prestigio que han trabajado en este modelo cabe destacar a Bunge [12], Barut [13,14], Zhang, Bhabha, Corben, Weyssenhoff, Pavsic, David Hestenes [15,16] o Martín Rivas [17].

Estos análisis matemáticos tratan de interpretar la ecuación de Dirac desde el punto de vista de la física clásica, mostrando una geometría del electrón oculta en la propia ecuación. Se trata por lo tanto de modelos matemáticamente compatibles con la Mecánica Cuántica. Hestenes denomina a este modelo el "Modelo Zitter del electrón". Cada autor presenta variantes importantes en este modelo, por lo que realmente debemos denominarlos "modelos Zitter del electrón".

Los modelos Zitter del electrón difieren entre sí pero todos llegan a la misma conclusión, que podría resumirse en el Principio del Movimiento Helicoidal: "Un electrón libre se mueve siempre a la velocidad de la luz siguiendo un movimiento helicoidal, con un radio constante, y con la dirección de desplazamiento perpendicular al plano de rotación".

El movimiento resultante será un movimiento helicoidal, análogo al movimiento observado de un electrón en un campo magnético externo homogéneo.



El modelo de electrón que se presenta en este trabajo (que denominaremos "**Modelo Helicoidal del electrón**") tiene muchos puntos en común con los modelos Zitter de Barut y Hestenes pero difiere en algunos conceptos importantes:

- Los modelos Zitter pretenden ser completos y formalizar matemáticamente la dinámica del electrón con campos electromagnéticos externos. Por el contrario, este modelo helicoidal está restringido al caso del electrón libre en ausencia de campos electromagnéticos externos. Para tratar al electrón ligado a un átomo habría que incorporar características adicionales al presente modelo.
- Los modelos Zitter postulan que el electrón es una partícula elemental mientras que el presente modelo helicoidal asume la posibilidad de una subestructura que explique el momento magnético anómalo del electrón.
- Los modelos Zitter asumen que la ecuación de Dirac es correcta y a partir de ella desarrollan e interpretan los resultados hasta llegar a un modelo físico del electrón. Por el contrario, el presente modelo helicoidal no tiene en cuenta la ecuación de Dirac y no asume en ningún momento la validez de la misma como premisa.
- Los modelos Zitter son relativistas, ya que parten de la ecuación Dirac que es relativista. Sin embargo el modelo helicoidal no trata la Relatividad Especial como una premisa del modelo sino como una consecuencia del movimiento helicoidal.

Relatividad Especial

Tal como propone T.S. Natarajan [18], partiendo del movimiento helicoidal del electrón y asumiendo que el electrón es un partícula que se se desplaza siempre a la velocidad de la luz, es posible deducir las transformaciones de Lorentz de la Teoría de Relatividad Especial (TRE) como una consecuencia de este modelo.

El movimiento del electrón helicoidal se puede descomponer en dos componentes ortogonales: un movimiento de rotación y un movimiento de traslación. Las velocidades de rotación y traslación no son independientes, sino que están condicionadas por la velocidad tangencial del electrón, que debe ser constante e igual a la velocidad de la luz.

En el electrón en reposo, la velocidad de rotación será igual a la velocidad de la luz, como ya hemos analizado anteriormente. A medida que aumente la velocidad de traslación, disminuirá la velocidad de rotación. La velocidad de traslación no podrá superar en ningún momento la velocidad de la luz.

Por el Teorema de Pitágoras, la relación entre las tres velocidades será:

$$c^2 = v_r^2 + v_t^2$$

Por lo que la velocidad de rotación en del electrón en movimiento será:

$$v_r = c\sqrt{1 - (v/c)^2} = c/\gamma$$

Siendo gamma el coeficiente de las Transformadas de Lorentz, la base de la TRE.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Multiplicando los tres componente por el mismo factor:

$$(\gamma mc)^2 c^2 = (\gamma mc)^2 v_r^2 + (\gamma mc)^2 v_t^2$$

Sustituyendo por el valor de la velocidad de rotación en movimiento y por la definición del movimiento lineal (p), obtenemos la fórmula de la energía relativista

$$E^2 = (\gamma mc^2)^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

El periodo de rotación del electrón actúa como un reloj interno del electrón. Gracias a ello, aunque no exista un tiempo absoluto en el universo, siempre es posible establecer un tiempo propio para cada electrón. Este tiempo propio será relativo al marco de referencia del electrón y a su velocidad relativa respecto a otros marcos de referencia inerciales.

Tal como hemos calculado, el periodo de rotación del electrón depende de la velocidad de desplazamiento del electrón. La velocidad de desplazamiento no es absoluta sino relativa al sistema de referencia inercial. Esto implica que el tiempo interno del electrón también es relativo al sistema de referencia.

El periodo de rotación de un electrón en reposo es:

$$T = \frac{R}{v_r} = \frac{R}{c}$$

Si suponemos que el radio del electrón (R) y la velocidad tangencial (v=c) son invariantes para cualquier observador inercial, la velocidad de rotación dependerá de la velocidad de traslación (v) respecto al marco de referencia inercial. El periodo de rotación calculado en el marco de referencia inercial será:

$$T' = \frac{R}{v_r} = \frac{R}{c/\gamma} = \gamma T$$

Lo que se puede interpretar como que el tiempo se dilata proporcionalmente a la velocidad de traslación relativa. La frecuencia propia del electrón se ve afectada de manera inversa:

$$f' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{\gamma T} = \frac{f}{\gamma}$$

Por otro lado, la distancia recorrida por la partícula es igual a la velocidad tangencial dividida por el

tiempo. Para el electrón en reposo la distancia recorrida por unidad de tiempo será:

$$X = \frac{c}{T}$$

Para un observador inercial, la velocidad tangencial sigue siendo igual a la velocidad de la luz, sin embargo el tiempo será distinto. Lo que puede interpretarse como que las distancias se contraen proporcionalmente a su velocidad de traslación relativa:

$$X' = \frac{c}{T'} = \frac{c}{\gamma T} = \frac{X}{\gamma}$$

Finalmente, el momento angular del electrón en reposo es:

$$L = mRv = mRc$$

Si asumimos que el radio del electrón y el momento angular son invariantes respecto al observador inercial ($R = R'$, $L = L'$), necesariamente la masa debe ser relativa al sistema de referencia. Para el observador inercial moviéndose a una velocidad (v), tenemos que:

$$L' = m'R'v' = m'R'\frac{c}{\gamma}$$

$$m' = \gamma m$$

Lo que puede interpretarse como que la masa del electrón aumenta proporcionalmente a la velocidad de traslación relativa.

Movimiento Helicoidal

Cuando la velocidad de traslación es uniforme, el electrón se desplaza siguiendo una trayectoria helicoidal. La posición de la partícula viene definida por la función $r(t)$, siendo w la frecuencia angular del electrón. La velocidad y la aceleración se obtienen derivando la función $r(t)$:

$$\begin{aligned} r(t) &= (R\cos(wt), R\sin(wt), vt) \\ r'(t) &= (-v_r\sin(wt), v_r\cos(wt), v) & |r'(t)| &= c \\ r''(t) &= \left(-\frac{v_r^2}{R}\cos(wt), -\frac{v_r^2}{R}\sin(wt), 0\right) & |r''(t)| &= v_c^2/R \end{aligned}$$

Tal como esperábamos, el módulo de la velocidad corresponde con la velocidad de la luz y el módulo de aceleración corresponde con la aceleración centrípeta.

Si el electrón está en movimiento rectilíneo uniforme ($v = cte$), la trayectoria de la partícula es una hélice cilíndrica. La geometría de esta hélice estará definida por dos parámetros constantes: el Radio (R) y la distancia de separación entre dos vueltas de la hélice, también llamado Paso de Hélice (H).

El Radio de la hélice se corresponde con la longitud de onda compton reducida. El paso de hélice se calcula multiplicando la velocidad de traslación (v) por el tiempo empleado (T). En el mismo tiempo (T), la hélice habrá dado una vuelta completa a la velocidad de rotación.

$$v_t T = H \quad v_r T = 2\pi R = \lambda_c$$

Igualando ambos tiempos, obtenemos el valor del paso de hélice

$$H = \lambda_c \frac{v_t}{v_r} = \lambda_c \frac{v_t}{c/\gamma} = \lambda_c \frac{\gamma v}{c}$$

Para finalizar, obtendremos el resto de parámetros representativos de una hélice cilíndrica, como son la curvatura y la torsión. Según el Teorema de Lancret, la condición necesaria y suficiente para que una curva sea una hélice es que la relación entre la curvatura y la torsión sea constante. Esta relación es igual a la tangente del ángulo que forma el plano de osculación con el eje de la hélice:

$$\begin{aligned} h &= \frac{H}{2\pi} = \frac{v}{w} = \frac{\gamma R v}{c} \\ \kappa &= \frac{R}{R^2 + h^2} = \frac{1}{\gamma^2 R} \\ \tau &= \frac{h}{R^2 + h^2} = \frac{1}{\gamma R} \left(\frac{v}{c}\right) \\ \tan \alpha &= \frac{\kappa}{\tau} = \frac{R}{h} = \frac{v_r}{v} = \frac{c}{\gamma v} \end{aligned}$$

El movimiento helicoidal se puede interpretar como un movimiento ondulatorio con longitud de onda igual al paso de hélice y una frecuencia igual a la frecuencia propia del electrón. Multiplicando ambos factores obtenemos la velocidad de traslación del electrón.

$$\lambda = H = \gamma \lambda_c (v/c)$$

$$f' = \frac{f}{\gamma} = \frac{mc^2}{\gamma h}$$

$$\lambda f' = \left(\gamma \lambda_c \frac{v}{c}\right) \left(\frac{mc^2}{\gamma h}\right) = \left(\gamma \frac{h}{mc} \frac{v}{c}\right) \left(\frac{mc^2}{\gamma h}\right) = v$$

Longitud de onda de de Broglie

Reordenando los términos podemos expresar el valor del Paso de Hélice en función de la longitud de onda de Broglie:

$$H = \lambda_c \frac{v}{c/\gamma} = \lambda_c \frac{\gamma v}{c} \frac{hm}{hm} = \lambda_c \frac{h}{mc} \frac{\gamma mv}{h}$$
$$\lambda_B = \frac{h}{\gamma mv} \quad H = \frac{\lambda_c^2}{\lambda_B}$$

Este resultado es sorprendente y tiene importantes implicaciones. Básicamente el modelo del electrón helicoidal establece una longitud de onda proporcional a la velocidad de traslación, mientras que la hipótesis de de Broglie establecía una longitud de onda inversamente proporcional a la velocidad de traslación. Si multiplicamos esta longitud de onda por la frecuencia propia del electrón obtenemos la velocidad de traslación, mientras que si multiplicamos la longitud de onda de de Broglie por la frecuencia propia del electrón obtenemos una velocidad superlumínica. De Broglie se encontró con la misma dificultad al realizar sus cálculos y tuvo que definir esta velocidad superlumínica como “velocidad de fase” de la onda, y realizar varias aproximaciones para obtener una “velocidad de grupo” que fuese igual a la velocidad de traslación del electrón. El resultado de de Broglie es una onda de materia compleja, formada por la superposición de dos ondas: una onda portadora y otra onda modulada en amplitud (también conocida como paquete de onda).

El modelo de electrón helicoidal contradice el modelo de de Broglie ya que la longitud de onda de de Broglie no se corresponde con ninguna longitud real y tampoco aparece ninguna velocidad de fase superlumínica ni ninguna onda modulada.

Es posible probar experimentalmente las dos teorías y comprobar cual es la correcta. Para ello se podría emitir electrones contra una superficie cristalina, donde la longitud de onda teórica de los electrones coincidiera con la distancia de separación entre los átomos del cristal. Esta interacción debería producir algún tipo de resonancia o patrón de interferencia que podría ser detectado. La gran diferencia entre las dos teorías es la energía cinética necesaria. En el caso de la longitud de onda de de Broglie, esta energía está en el orden de unos 50eV, mientras que el caso del modelo helicoidal, la energía necesaria estaría en el orden de unos 80MeV (un millón de veces superior).

El primer experimento se realizó exitosamente en 1927 por Davisson y Germer. De esta manera se confirmó la hipótesis de de Broglie. Tanto de Broglie como Davisson recibieron el premio Nobel por estos descubrimientos. El segundo experimento nunca se llegó a realizar, tanto por limitaciones técnicas de la época como por la falta de interés en comprobar teorías alternativas.

En 2005, Michel Gouanère [20] realizó un experimento en el que identificaba esta segunda longitud de onda con energías de unos 80MeV. El experimento no ha tenido excesiva trascendencia ya que contradice uno de los pilares básicos de la Mecánica Cuántica. Sin embargo, tanto David Hestenes [20] como Martín Rivas [21] opinan que el experimento es muy importante y que aporta pruebas experimentales

congruentes con los modelos Zitter del electrón. Pero, ¿Qué pasa entonces con el experimento de Davisson-Germer?. Puede que simplemente se trate de una interpretación incorrecta de los datos experimentales. El experimento de Davisson-Germer fue aceptado muy rápidamente ya que confirmaba experimentalmente una hipótesis que había entusiasmado tanto a Einstein como a Bohr. Nadie se planteó seriamente otras explicaciones para los resultados obtenidos a pesar de que ciertos datos experimentales discrepaban con la teoría. Pero sí que existen explicaciones alternativas al experimento. Por ejemplo, Alfred Phillips Jr. del Source Institute [22] propone una explicación diferente: “los electrones incidentes provocan oscilaciones de plasma en la estructura cristalina que se reflejan en la superficie como una onda”.

Schrodinger se basó en la longitud de onda de Broglie para definir su ecuación, por lo que si la longitud de onda de Broglie es incorrecta, las ecuaciones de Schrodinger y Dirac también deberían ser incorrectas. ¿Cómo es posible que ecuaciones que parten de premisas incorrectas permitan obtener resultados correctos? Curiosamente, si sustituimos la velocidad de propagación por la velocidad de rotación, la ecuación de de Broglie se convierte en la ecuación del momento angular y el diámetro de la órbita del electrón se corresponde con su longitud de onda. De este modo, una interpretación incorrecta de una ecuación incorrecta permite obtener resultados correctos.

Conclusiones

Si las partículas subatómicas tienen “spin” necesariamente “algo tiene que girar alrededor de algo”. Un electrón no puede rotar sobre sí mismo ya que implicaría velocidades muy superiores a la velocidad de la luz. Una alternativa es suponer que el electrón rota respecto a un punto del espacio a la velocidad de la luz a una distancia del orden de la longitud de onda Compton formando una trayectoria en forma de anillo. El movimiento de rotación de la carga unitaria es la causa del momento magnético del electrón. Analizando la ecuación de Dirac e interpretando el Zitterbewegung como un movimiento de rotación real del electrón, se llega a una conclusión similar. Teorías semiclásicas parecidas han sido planteadas en multitud de ocasiones por más de un centenar de investigadores de la talla de Arthur Compton (Premio Nobel 1927) o David Hestenes (Medalla Oersted 2002).

Analizando el movimiento helicoidal del electrón se obtiene los mismos resultados que la teoría de la relatividad especial. Considerando el electrón como un circuito LC resonante se obtiene la frecuencia Compton como frecuencia de resonancia y aparecen como parámetros relacionados la Resistencia Hall Cuántica y el Cuanto de Flujo Magnético.

El movimiento del electrón sigue una trayectoria helicoidal, con un radio igual a la longitud de onda Compton y un paso de hélice inversamente proporcional a la longitud de onda de De Broglie. Este modelo implica que la hipótesis de de Broglie sobre la longitud de onda del electrón es incorrecta, lo que plantea dudas sobre la validez de las ecuaciones de Schrodinger y Dirac, o al menos, sobre la interpretación de sus resultados.

Referencias

- [1] Parson, A. L., "A Magnetron Theory of the Structure of the Atom," Smithsonian Miscellaneous Collections 65, 2-80 (1915).
- [2] A.H. Compton, "The Size and Shape of the Electron - American Physical Society address (1917)
- [3] Allen, H. S., "The Case for a Ring Electron," Proceedings of the Physical Society 31, 49-68 (1919)
- [4] Iida, Shuichi, "A Persistent Electric Current Model of the Electron with a New Explanation for $g = 2(1 + \alpha/2\pi)$," Journal of the Physical Society of Japan, 37, 1183-1190 (1974)
- [5] Bostick, Winston H., "Mass, Charge and Current: The Essence and Morphology," Physics Essays, Vol. 4, No. 1, (1991)
- [6] D. Bergman, J.P. Wesley, "Spinning Charged Ring Model of Electron Yielding Anomalous Magnetic Moment," Galilean Electrodynamics 1, 63-67 (1990)
- [7] H.J. Auvermann, "An elementary electron model for electron-electron scattering based on static magnetic field energy" (2001)
- [8] L. Ryder, Relativistic treatment of inertial spin effects, J. Phys. A 31, 2465 (1998).
- [9] Jennison, R.C., "What is an Electron?" Wireless World 28:1522, 42-47 (1979)
- [10] Williamson, J.G. and van der Mark, M.B. "Is the electron a photon with toroidal topology?"
- [11] K. Huang, "On the Zitterbewegung of the Dirac Electron", Am. J. Phys. 20, 479 (1952)
- [12] M. Bunge, A picture of the electron, Nuovo Cimento 1, 977 (1955).
- [13] A.O. Barut and A.J. Bracken, "Zitterbewegung and the internal geometry of the electron," Phys. Rev. D 23, 2454 (1981)
- [14] A.O. Barut and N. Zanghi, "Classical Model of the Dirac Electron", Phys. Rev. Lett. 52, 2009 (1984)
- [15] D. Hestenes, "The Zitterbewegung Interpretation of Quantum Mechanics", Found. Phys. 20, 1213 (1990)
- [16] D. Hestenes, "Zitterbewegung in Quantum Mechanics", arXiv:8002.2728 (2008)
- [17] M. Rivas. "Kinematical Theory of Spinning Particles". Kluwer, Dordrecht, (2001).
- [18] Natarajan T.S., "Do Quantum Particles Have a Structure?", Department of Physics, Indian Institute of Technology. (1996)
- [19] M. Gouanère, "A Search for the de Broglie Particle Internal Clock by Means of Electron Channeling". Foundations of Physics 38: 659-664. (2008)
- [20] D. Hestenes, "Reading the Electron Clock". arXiv:0802.3227 (2008)
- [21] M. Rivas, "Measuring the internal clock of the electron". arXiv:0809.3635 (2008)
- [22] Alfred Phillips Jr.. "Atonic Mechanics Part I", Source Institute <http://sourceinstitute.org> (2009)